

5.03.06

454

С  
Министерство высшего и среднего специального образования  
С С С Р

Челябинский политехнический институт  
имени Ленинского комсомола

На правах рукописи

УДК 621.791.052:539.4

ГЕЦФРИД Эдуард Иванович

МЕТОДИКА РАСЧЕТНОЙ ОЦЕНКИ ДЛИТЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ  
СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ТРУБ ПАРОПЕРЕГРЕВАТЕЛЕЙ  
ИЗ РАЗНОРОДНЫХ СТАЛЕЙ И РАЗРАБОТКА МЕРОПРИЯТИЙ  
ПО ПОВЫШЕНИЮ ИХ НАДЕЖНОСТИ

05.03.06 - Технология и машины сварочного производства

Автореферат диссертации на соискание ученой  
степени кандидата технических наук

Челябинск

1985

Работа выполнена в Уральском филиале Всесоюзного дважды ордена Трудового Красного Знамени теплотехнического научно-исследовательского института имени Ф.Э. Дзержинского (УралВИ).

Научный руководитель - доктор технических наук,  
старший научный сотрудник  
Шрон Р.З.

Официальные оппоненты - доктор технических наук,  
профессор Земзин В.Н.,  
доктор технических наук,  
доцент Садаков О.С.

Ведущее предприятие - Подольский машиностроительный завод  
имени С. Орджоникидзе.

Защита диссертации состоится " 26 " июня 1985 г.  
в 15 ч на заседании специализированного совета К 053.13.02  
в Челябинском политехническом институте имени Ленинского комсомола по адресу: 454044, пр. им. В.И. Ленина, 76.

Ваши отзывы в 2-х экземплярах, заверенные печатью, просим  
высылать по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЧПИ  
имени Ленинского комсомола.

Автореферат разослан "23 " мая 1985 г.

Ученый секретарь  
специализированного совета,  
кандидат технических наук



Г.В. Савельев

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Отечественный и зарубежный опыт эксплуатации мощных энергоблоков тепловых электростанций свидетельствует о пониженной надежности сварных соединений пароперегревательных труб из разнородных сталей (разнородных сварных соединений - РСС). Один вынужденный останов энергоблока из-за повреждения РСС приводит к ущербу в 20-30 тыс. рублей. Число таких остановов достаточно велико, что делает актуальной проблему повышения надежности РСС.

Эффективное решение этой проблемы невозможно без изучения основных причин преждевременных разрушений РСС. Одна из причин, ранее не анализировавшаяся, заключается в различии скоростей ползучести металлов сваренных труб. Следует отметить также отсутствие методик расчетной оценки длительной прочности РСС, учитывающих разупрочняющее действие такого хорошо известного фактора как диффузия углерода. В ряде случаев это приводит к завышению прогнозируемого ресурса по сравнению с истинным. Сходные проблемы возникают при анализе напряженного состояния и прочности РСС, эксплуатирующихся в составе оборудования атомных электростанций, химического и других производств.

Настоящая работа выполнялась в рамках комплексной программы ГКНТ О.Ц.002, подпрограммы О.ОІ.ОІ.Ц (задание 09.НІ5 "Исследования по увеличению ресурса энергоблоков сверх 150-200 тыс. ч и разработка мероприятий по увеличению их ресурса").

Цель работы - создание методики расчетной оценки длительной прочности РСС, учитывающей влияние различия скоростей ползучести сваренных элементов и разупрочняющее действие диффузии углерода, а также разработка мероприятий по повышению надежности РСС труб пароперегревателей.

Методы исследования. При теоретическом анализе напряженного состояния РСС использовался вариационный метод, при экспериментальном - метод муара; закономерности роста обез-

углероденных прослоек изучались металлографическим методом, решение двумерной задачи диффузии углерода получено с помощью метода конформных отображений; экспериментальные исследования длительной прочности включали испытания образцов и натуральных сварных соединений под действием растягивающей силы и внутреннего давления.

Научная новизна. Впервые установлено неблагоприятное влияние различия скоростей ползучести сваренных элементов на напряженное состояние и длительную прочность РСС. Полученные приближенные решения описывают напряженное состояние менее прочного компонента стыковых соединений равнопрочных стержней, пластин и труб при различных действующих на них нагрузках.

Экспериментально показана зависимость формы обезуглероженной прослойки от геометрических особенностей РСС и установлено, что эта зависимость обусловлена многомерным характером диффузии углерода. Для прогнозирования формы и скорости роста обезуглероженной и науглероженной прослоек в работе предложена методика решения двумерной задачи диффузии.

Разработана методика расчетной оценки длительной прочности РСС, позволяющая количественно определить разупрочняющее влияние различия скоростей ползучести сваренных элементов и диффузии углерода.

Практическая ценность. Созданный комплекс расчетных методик позволяет осуществлять экстраполяцию результатов относительно кратковременных испытаний РСС на длительную прочность в область больших значений долговечности, дает возможность раздельного анализа влияния двух важных факторов — различия скоростей ползучести металлов и диффузии углерода. Это имеет существенное значение при выборе путей повышения надежности РСС, определении оптимальных их размеров, сроков ремонта.

На основании проведенных исследований определены допускаемые напряжения и коэффициенты прочности РСС труб пароперегревателей из сталей 12Х1МФ и 12Х1ВН12Т, выбраны необходимые сечения стыков в зависимости от условий эксплуата-

ции и способа сварки, разработана новая технология сварки РСС разнотолщинных труб, разработаны и испытаны на действующем оборудовании новые конструкции систем крепления змеевиков пароперегревателей, уменьшающие изгибные напряжения в РСС.

Результаты работы внедрены на Подольском машиностроительном заводе им. С. Орджоникидзе (ЗиО), Кармановской, Рязанской, Троицкой ГРЭС, Экибастузской ГРЭС-1, нашли отражение в нормативных документах - в приказе Минэнерго СССР № 3 от 3.01.83 г. и в новой редакции отраслевого РТМ 24.940.08-74. Годовой эффект от внедрения составил 137 тыс. рублей.

Апробация работы. Диссертация заслушана и рекомендована к защите на научных семинарах кафедры сварки Челябинского политехнического института им. Ленинского комсомола, кафедры "Машины и автоматизация сварочных процессов" МВТУ им. Н.Э. Баумана. Основные результаты работы доложены на конференциях сварщиков Урала в Кургане (1982 г.), Свердловске (1983 г.), областных конференциях сварщиков (Челябинск, 1980-1982 гг.).

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав и общих выводов. Она изложена на 134 страницах машинописного текста, включает 50 рисунков на 44 страницах и 5 таблиц. Список литературы насчитывает 106 наименований.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

### 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ, АНАЛИЗ ПРИЧИН ПОВРЕЖДЕНИЙ РСС ТРУБ ПАРОПЕРЕГРЕВАТЕЛЕЙ

Пароперегреватели, содержащие рассматриваемые элементы, представляют собой систему змеевиков из труб аустенитной (12Х18Н12Т) и перлитной (12Х1МФ) стали диаметром 32-60 мм, по которым проходит перегретый пар с температурой 520-560°С под давлением 4-25 МПа. В заводских условиях соединение труб из аустенитной и перлитной стали осуществляется, как правило, с помощью контактной сварки оплавлением.

Повреждения РСС, связанные с истощением ресурса, начинаются через 20-30 тыс. часов эксплуатации. Трещины имеют межкристаллитный характер, развиваются с наружной или внутренней поверхности трубы из перлитной стали вблизи границы сплавления. Анализируя причины повреждений РСС труб пароперегревателей, большинство авторов указывают на решающую роль ползучести, а также на разрушительное действие диффузии углерода. В то же время не принимается во внимание влияние различия скоростей ползучести сваренных элементов. Указанное различие может быть довольно существенным. К примеру, скорости ползучести сталей 12ХМФ и 12Х18Н1Т при температурах и напряжениях обычных для труб пароперегревателей отличаются более чем на порядок.

Диффузия углерода, протекающая в сварном соединении разнородных сталей при повышенных температурах, изучалась многими исследователями. Благодаря работам В.Н. Земзина, Г.Л. Петрова, Б.И. Брука, Ю.Н. Готальского, В.А. Игнатова, Л.С. Лившица, Даркена, Кристоффеля и Куррана, Эмерсона, Хатчинсона и др. были достигнуты значительные успехи в понимании физики процесса, разработаны эффективные меры по уменьшению скорости диффузии. Тем не менее некоторые из вопросов изучены еще недостаточно. Отсутствует методика количественной оценки влияния обезуглероживания на длительную прочность РСС. Как показали исследования, проведенные в УралВТИ (при участии автора), форма обезуглероженной прослойки зависит от геометрии соединения. Это затрудняет прогнозирование скорости роста прослоек в соединениях с отличающейся геометрией, т.к. неясно, в какой степени влияют свойства материалов, в какой геометрии.

В ряде случаев пониженную прочность РСС труб пароперегревателей пытаются объяснить действием температурных напряжений, обусловленных различием коэффициентов линейного расширения металлов. Однако результаты испытаний на длительную прочность при наличии теплосмен и соответствующие расчетные оценки (работы В.Н. Земзина, Н.М. Королева, Харди, Вайсберга и др.) показывают, что при длительных выдержках в

цикле нагружения термоусталость оказывает незначительное влияние по сравнению с ползучестью.

Как следует из работ В.А. Нахалова, Ю.В. Балашова, Лундина, Шафера долговечность РСС в значительной мере зависит от изгибных напряжений, возникающих в эластичных пароперегревателях из-за различных недостатков систем их крепления. Поэтому снижение указанных напряжений — один из наиболее эффективных путей повышения надежности РСС труб пароперегревателей.

На основании материалов, изложенных в первой главе, сформулированы цели и задачи исследования.

## 2. АНАЛИЗ НАПРЯЖЕНИЙ, ВОЗНИКАЮЩИХ В РСС ИЗ-ЗА РАЗЛИЧИЯ СКОРОСТЕЙ ПОЛЗУЧЕСТИ СВАРЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Рассматриваемые напряжения обусловлены стеснением деформаций менее прочного металла вблизи зоны сплавления более прочным (и более "твердым"). Аналогичное явление наблюдается при деформировании "мягких" тонких прослоек, особенности напряженного состояния которых достаточно полно исследованы в работах О.А. Бакиши, Р.З. Прона и др.

В диссертации получены приближенные аналитические решения задач ползучести стыковых соединений разнородных стержней (нагружение растягивающей силой), пластин (растяжение, изгиб с растяжением) и труб (внутреннее давление и растяжение). Решения найдены вариационным методом при следующих упрощающих предположениях: для менее прочного металла справедлив степенной закон ползучести; более прочный металл не деформируется; упругие деформации не учитываются; справедливы гипотеза плоских сечений (для соединения пластин и стержней) и гипотеза прямых нормалей (для соединения тонкостенных труб). Ход решения задач ползучести стержней и пластин примерно одинаков, ниже он описан применительно к задаче растяжения пластин.

Из предположения о недеформируемости более прочного компонента следует, что для пластины из менее прочного "мягкого" металла граница сплавления является заделкой. Использование гипотезы плоских сечений позволяет выразить все ком-

попенты напряженно-деформированного состояния через первую и вторую производные неизвестной функции  $u(\xi)$ , характеризующей скорости перемещения поперечных сечений "мягкой" пластины в осевом направлении  $\xi$  (начало системы координат расположено в середине зоны сплавления). Приближенное выражение для  $u''(\xi)$  было принято в виде двух членов экспоненциального ряда. Для определения предэкспоненциальных множителей  $a_1$  и  $a_2$  использованы условия статической эквивалентности. Множитель показателя экспоненты  $\alpha$  находился из условия минимума дополнительной мощности. При реальных значениях показателя ползучести  $n \geq 3$  было найдено:  $\alpha \approx 2n$ ;  $a_1 = 0,59$ ;  $a_2 = 0,82$ . Конечные выражения для нормальных  $\sigma_x, \sigma_y$ , касательных  $\tau_{xy}$  напряжений и интенсивности напряжений  $\sigma_i$  имеют вид:

$$\begin{aligned} \sigma_y &= \frac{2+\nu}{1+\nu} (1-\nu^{1+\nu}) F(\xi) \tilde{\sigma}_x; \quad \sigma_x = \sigma_y + (1-F) \tilde{\sigma}_x; \\ \tau_{xy} &= -\left[ \frac{\alpha \nu}{2} (a_1 e^{-\alpha \xi} + a_2 e^{-2\alpha \xi}) \right] \frac{\tilde{\sigma}_x}{2}; \\ \sigma_i &= (\sqrt{3}/2) \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2}. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь  $\nu = 1/n$ ;  $\xi = x/h$ ;  $\nu = y/h$ ;  $2h$  - толщина пластины;  $\tilde{\sigma}_x$  - номинальное осевое напряжение

$$F(\xi) = \left( \frac{a_1 e^{-\alpha \xi} + a_2 e^{-2\alpha \xi}}{a_1 + a_2} \right)^{1-\nu} \frac{a_1 e^{-\alpha \xi} + 2a_2 e^{-2\alpha \xi}}{a_1 + 2a_2} \quad (2)$$

Отмеченное выше сходство задач ползучести РСС и "мягких" прослоек проявилось в том, что нормальные напряжения в зоне сплавления РСС и на контактной поверхности прослойки совпали, а касательные напряжения оказались подобными. Это справедливо для всех рассмотренных случаев нагружения разнородных стержней и пластин.

Исходя из анализа микроструктурных особенностей разрушения РСС, а также из того факта, что трещины развиваются с краев границы сплавления, где максимальны сдвиговые компо-

ненты напряженного состояния, предложено оценивать длительную прочность РСС по наибольшему значению интенсивности напряжений  $\sigma_{i\max}$ . Проведенные методом Мура экспериментальные исследования напряженного состояния показали пригодность расчетных формул для оценки  $\tau_{xy}$  и  $\sigma_{i\max}$ . Эпюры нормальных напряжений (расчетные и экспериментальные) совпали лишь качественно.

Определение напряжений в зоне сплавления тонкостенных труб из разнородных металлов проводилось в два этапа. Вначале с помощью известных решений задач ползучести заземленной полубесконечной оболочки находился краевой изгибающий момент, действующий в заделке (зоне сплавления). Затем с помощью решения для стыкового соединения разнородных пластин при комбинированном нагружении строились эпюры напряжений в зоне сплавления и определялась величина  $\sigma_{i\max}$  в зависимости от номинальных осевых  $\bar{\sigma}_x$  и тангенциальных  $\bar{\sigma}_\varphi$  напряжений. На основании проведенных расчетов построены графики для определения коэффициента концентрации интенсивности напряжений  $K_{\sigma_i}(n, \bar{\sigma}_\varphi/\bar{\sigma}_x)$ , под которым понимается отношение  $\sigma_{i\max}$  к номинальному значению интенсивности напряжений  $\bar{\sigma}_i$  ( $\bar{\sigma}_i^2 = \bar{\sigma}_x^2 - \bar{\sigma}_x\bar{\sigma}_\varphi + \bar{\sigma}_\varphi^2$ ). Величина  $K_{\sigma_i}$  зависит от отношения  $\bar{\sigma}_\varphi/\bar{\sigma}_x$  и показателя ползучести  $n$ . Для соединения разнородных труб, нагруженных внутренним давлением, при  $n = 3...5$  коэффициент  $K_{\sigma_i}$  равен  $1,8...1,7$ .

Возможность использования предложенной методики для оценки влияния на длительную прочность РСС различия скоростей ползучести сваренных труб была проверена экспериментально. Испытывались при растяжении и под действием внутреннего давления РСС труб пароперегревателей из сталей 12Х1МФ и 12Х18Н12Т (контактные и электродуговые стыки). В температурно-временном интервале отсутствия влияния обезуглероживания наблюдаемое снижение прочности РСС по отношению к прочности стали 12Х1МФ оказывалось близким к прогнозируемому с помощью коэффициента  $K_{\sigma_i}$ .

### 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ОБРАЗОВАНИЯ ОБЕЗУГЛЕРОЖЕННЫХ ПРОСЛОЕВ В РСС

Вначале приводится решение одномерной задачи диффузии

углерода для случая, когда в менее легированной стали происходит распад карбидов, а в более легированной — образование карбидов. Схема перераспределения углерода при диффузии была принята такой же как и в известных решениях Вагнера, Кристоффели и Куррана, однако в отличие от последних учитывался взаимосвязанный характер роста обезуглероженной и науглероженной прослоек.

Исходная система уравнений включала условия баланса вещества на границах прослоек и в зоне сплавления, а также условие равенства активностей углерода на границе сплавления. Значения концентраций свободного углерода  $C_1$  и  $C_2$  на границах обезуглероженной  $X_1$  и науглероженной  $X_2$  прослоек считались заданными. В результате решения получены следующие выражения для зависимостей  $X_1$  и  $X_2$  от времени  $t$ :

$$X_1(t) = \frac{1}{\Delta C_1} \sqrt{\frac{\gamma_1 C_1 - \gamma_2 C_2}{R_1 + R_2} 2t} ; \quad X_2 = \frac{\Delta C_1}{\Delta C_2} X_1 \quad (3)$$

Здесь  $R_1 = \gamma_1 / (\Delta C_1 D_1)$ ;  $R_2 = \gamma_2 / (\Delta C_2 D_2)$  — "сопротивления" прослоек;  $\gamma_1, \gamma_2$  — коэффициенты активности углерода;  $\Delta C_1$  — падение концентраций углерода в обезуглероженной прослойке;  $\Delta C_2$  — величина, характеризующая степень науглероживания более легированного металла;  $D_1, D_2$  — эффективные коэффициенты диффузии углерода.

Формулы (3) позволяют учесть влияние свойств более легированного металла на скорость роста обезуглероженной прослойки. В частности, они описывают известную из экспериментов зависимость  $X_1$  от содержания карбидообразующих элементов в компоненте 2. С увеличением концентрации таких элементов возрастает  $\Delta C_2$  и уменьшается  $R_2$ , что влечет за собой увеличение скорости роста  $X_1$ . При отсутствии в компоненте 2 свободных карбидообразующих элементов ( $\Delta C_2 = 0$ ) диффузия углерода не наблюдается.

Физическая модель, аналогичная описанной, была использована при решении двумерной задачи. В работе дается формулировка такой задачи в квазистационарной постановке, т.е. в предположении, что распределение концентрации углерода в

пределах диффузионных слоев удовлетворяет уравнению Лапласа. В предложенном приближенном решении для построения контуров обезуглероженной  $\Gamma_1$  и науглероженной  $\Gamma_2$  прослоек применен метод конформных отображений. Привязка контуров  $\Gamma_1$  и  $\Gamma_2$  ко времени осуществлена с помощью интегральных условий баланса вещества.

Были проанализированы закономерности изменения формы и скорости роста обезуглероженных прослоек в двух типах образцов: в пластине с наплавленным на ее поверхность эллиптическим валиком и в стыковом соединении разнородных пластин при наклонном расположении границы сплавления. В образце первого типа контур обезуглероженной прослойки стремится принять форму окружности. В стыковом соединении пластин с наклонной границей сплавления наблюдается разворот фронта обезуглероженного олоя и в конечном итоге он становится перпендикулярным оси соединения. Последняя закономерность была выявлена экспериментально. Совпадение расчетных и экспериментальных данных вполне удовлетворительное. Для определения ширины обезуглероженной прослойки в вершине угловой области с углом  $\theta$  предложена следующая простая формула

$$X_1^0 = X_1 \operatorname{ctg}(\theta/2), \quad (4)$$

где  $X_1$  находится по первой из формул (3).

Разработанная методика решения двумерной задачи диффузии использована для исключения влияния геометрического фактора при обработке результатов измерения скорости роста обезуглероженных прослоек в РСС сталей 12Х1М $\Sigma$  и 12Х18Н12Т. Одна из возможных областей применения ее в дальнейшем — оптимизация геометрии РСС с целью уменьшения неблагоприятного влияния обезуглероживания.

#### 4. МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ДЛИТЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ РСС

Методика учитывает влияние напряжений, обусловленных различием скоростей ползучести сваренных элементов, и разупрочняющее действие диффузии углерода.

Исходя из анализа результатов испытаний РСС на длительную прочность и общих соображений относительно влияния указанных двух факторов предложено аппроксимировать кривую длительной прочности РСС (в двойных логарифмических координатах) трехзвенной ломаной линией. Первый участок линии, соответствующий большим напряжениям и малым долговечностям, совпадает с линией длительной прочности основного (менее прочного — далее эта оговорка не делается) металла. Это область "вязких" разрушений, происходящих по основному металлу вдали от зоны сплавления. Второй участок проходит параллельно линии длительной прочности основного металла и располагается ниже нее, что объясняется действием напряжений, обусловленных различием скоростей ползучести сваренных сталей. Этому участку отвечают малопластичные разрушения по зоне сплавления при отсутствии заметного влияния обезуглероживания. Третий участок, расположенный в области малых напряжений и больших долговечностей, имеет несколько больший угол наклона по сравнению со вторым, что связано с прогрессирующим разупрочнением РСС вследствие обезуглероживания. Построение этого участка встречает наибольшие затруднения в связи с необходимостью проведения весьма продолжительных испытаний, соизмеримых по длительности со сроком службы котла.

С целью преодоления указанного затруднения разработана методика, основу которой составляют данные по скорости роста обезуглероженных прослоек и результаты относительно кратковременных испытаний образцов РСС на длительную прочность после предварительной термообработки (старения).

Вывод уравнения для второго и третьего участков линии длительной прочности РСС, представляющих наибольший интерес, основан на следующих предположениях: на втором участке время разрушения  $t_D$  и напряжения  $\sigma_{max}$  связаны степенной зависимостью; на третьем участке время разрушения  $t_D$  пропорционально  $t_D$  и обратно пропорционально ширине обезуглероженной прослойки в некоторой степени; ширина прослойки определяется на момент разрушения для опасной точки сварного соединения; температурная зависимость

длительной прочности основного металла описывается параметром Ларсена-Миллера; влияние температуры на скорость роста обезуглероженных прослоек характеризуется параметром Кристоффеля-Куррана. Полученное уравнение длительной прочности РСС, представленное в параметрической форме, имеет вид:

$$\rho_z \equiv \rho + \Delta\rho = s(\alpha - \lg \sigma_{i\max}). \quad (5)$$

Параметр  $\rho_z$  представляет собой сумму параметра Ларсена-Миллера  $\rho = T(c + \lg t)$  и дополнительного слагаемого  $\Delta\rho$ , учитывающего разупрочнение вследствие обезуглероживания. Второму участку линии длительной прочности РСС соответствует  $\Delta\rho = 0$ , для третьего участка

$$\Delta\rho = \alpha_* T \left[ c_* - \frac{K}{T} + \lg(t + t_0) + 2 \operatorname{ctg} \frac{\theta}{2} \right]. \quad (6)$$

Здесь  $T$  - температура в градусах Кельвина;  $K$  - постоянная Кристоффеля-Куррана;  $t_0$  - эквивалентное время предварительного старения, пересчитанное на температуру испытаний;  $\alpha_*$ ,  $c_*$  - постоянные, подлежащие определению.

Постоянные  $s$ ,  $a$ ,  $c$ , входящие в уравнение (5), находятся по результатам испытаний на длительную прочность РСС в исходном состоянии после сварки. В грубом приближении для этого могут быть использованы кривые длительной прочности основного металла. Постоянная  $K$  определяется по результатам измерения скорости роста обезуглероженных прослоек. Постоянные  $\alpha_*$  и  $c_*$ , характеризующие влияние обезуглероживания, предложено находить из испытаний на длительную прочность РСС с предварительно выращенными прослойками. Режимы старения выбираются такими, чтобы эквивалентное время старения было близко к расчетному сроку службы РСС при температуре эксплуатации.

С использованием предложенной методики построены параметрические зависимости длительной прочности РСС сталей 12Х1МФ и 12Х18Н12Т, выполненных контактной и дуговой сваркой электродами ЦТ-36. Определены допустимые тангенциальные напряжения  $[\tilde{\sigma}_p]$  и коэффициенты прочности  $\psi$  РСС грубо из

указанных сталей при нагружении труб внутренним давлением (под  $\psi$  понимается отношение  $[\sigma_r]$  к соответствующему значению допускаемых напряжений для стали 12Х1МФ). При номинальной для выходных ступеней пароперегревателей температуре 550°C и расчетной долговечности  $10^5$ – $2 \cdot 10^5$  часов коэффициент  $\psi$  контактных стыков равен 0,6–0,5. Для дуговых соединений  $\psi$  на 10–15% выше. Вклад в наблюдаемое снижение прочности РСС напряжений, обусловленных различием скоростей ползучести металлов, и диффузии углерода примерно одинаков.

#### 5. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА ДОЛГОВЕЧНОСТИ РСС ТРУБ ПАРОПЕРЕГРЕВАТЕЛЕЙ, РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПОВЫШЕНИЮ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ СТЫКОВ И СНИЖЕНИЮ ДЕЙСТВУЮЩИХ НА НИХ НАГРУЗОК

Оценена долговечность разнородных контактных стыков труб из сталей 12Х1МФ и 12Х18Н12Т с номинальным сечением 32x6 мм, работающих в выходных ступенях пароперегревателей котлов сверхкритического давления и имеющих наиболее низкую надежность. Вначале расчет проводился для базового режима работы – температуры 550°C и давления 24 МПа при отсутствии изгибных напряжений. Время разрушения оказалось равным примерно 60 тыс. часов, что меньше расчетного срока службы котла (обычно  $10^5$  или  $2 \cdot 10^5$  часов), но приблизительно втрое больше времени начала массовых разрушений РСС на некоторых котлах, наиболее неблагоприятных в отношении повреждаемости РСС. Последнее различие объясняется наличием в змеевиках дополнительных изгибных напряжений, о чем говорилось в главе I. Прямая оценка влияния изгибных напряжений в настоящее время не представляется возможной из-за множества случайных факторов, от которых они зависят, и значительной сложности экспериментальных исследований. Поэтому была выполнена приближенная оценка исходя из разницы расчетного (60 тыс. ч) и фактического (20 тыс. ч) времени разрушения. Она показала, что действие изгибных напряжений эквивалентно увеличению напряжений от внутреннего давления в 1,25 раза. С учетом этого проведены расчеты долговечности РСС в диапазоне тем-

ператур 520-570<sup>0</sup>С. Отдельно рассмотрены случаи отсутствия и наличия дополнительных изгибных напряжений. Исходя из опыта эксплуатации даны рекомендации об условиях, при которых следует учитывать влияние изгибных напряжений. Полученные данные позволяют более обоснованно подойти к вопросу о выборе сроков профилактических ремонтов РСС на действующем оборудовании.

Разработанная в диссертации методика оценки долговечности РСС была применена для выбора необходимых сечений стыков труб из сталей 12Х1МФ и 12Х1ВН12Т в зависимости от условий эксплуатации и способа сварки. Показано, что для пароперегревателей котлов сверхкритического давления номинальное сечение разнородных контактных стыков должно быть не 32х6 мм, а 42х11 мм. При использовании дуговой сварки и высоконикелевого прикладочного металла сечение стыков может быть уменьшено до 36х9 мм.

Для увеличения надежности и долговечности РСС труб пароперегревателей предложены мероприятия, имеющие своей целью повышение конструктивной прочности стыков и снижение действующих на них дополнительных нагрузок.

Разработана новая технология сварки равностенных труб из разнородных сталей, в которой выравнивание размеров труб осуществляется за счет предварительной наплавки слоя металла на более тонкостенную и прочную трубу. Последующая контактная сварка труб производится обычным способом.

Данная технология успешно прошла опробование на Подольском ЗНО. Сваривались трубы 32х6 мм (12Х1МФ) и 36х8 мм (12Х1ВН12Т). Предварительная наплавка велась автоматизированным способом с принудительным охлаждением внутренней поверхности трубы эмульсией, что позволило добиться максимальной для использованной установки производительности. Металлографические исследования и испытания на длительную прочность подтвердили высокое качество и работоспособность опытных стыков. Преимущество предложенной технологии сварки по сравнению со сваркой через утолщенную аустенитную вставку заключается в том, что не требуется дополнительный сортament аустенитных труб для изготовления вставок.

В работе приводятся рекомендации по разделке кромок при аргонодуговой сварке разнотолщинных труб из разнородных сталей, внедряемой в настоящее время на ЗиО. Предложено заменить конусную проточку края трубы из перлитной стали цилиндрической, что уменьшает концентрацию напряжений в месте сопряжения шва с основным металлом.

Разработаны рекомендации по снижению уровня изгибных напряжений в РСС. Для уменьшения сил сопротивления, возникающих при перемещении стоек крепления конвективных пароперегревателей по опорным балкам, предложено устанавливать стойки на поперечные ребра, привариваемые к балкам (а.с. № 694732). Данная конструкция внедрена на Кармановской ГРЭС, проведенные измерения изгибных напряжений подтвердили эффективность реконструкции.

Разработана новая конструкция крепления змеевиков конвективных пароперегревателей (а.с. № 688767) с помощью арочных неподвижных стоек, которые обеспечивают независимость тепловых перемещений отдельных змеевиков и позволяют существенно уменьшить изгибные напряжения в необогреваемых участках змеевиков. Конструкция принята в качестве базовой на ЗиО, внедрена на ряде серийных котлов.

Для реализации той же идеи — уменьшения вероятности заземлений змеевиков при тепловом расширении — предложено секционировать ранжирующее крепление ширмовых пароперегревателей. Это предложение прошло опытную проверку на действующем оборудовании и внедрено на ЗиО.

#### ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

I. Выявлены наиболее существенные причины пониженной надежности и долговечности РСС труб пароперегревателей. К ним относятся: различие скоростей ползучести сваренных сталей и обусловленное им перераспределение напряжений вблизи зоны сплавления; диффузия углерода, протекающая в условиях высокотемпературной эксплуатации и приводящая к развитию малопрочных обезуглероженных прослоек; наличие дополнительных изгибных напряжений в змеевиках пароперегревателей; вызван-

ных несовершенством систем крепления змеевиков. Влияние первой из названных причин установлено впервые.

2. Получены приближенные аналитические решения, описывающие поле напряжений в менее прочном компоненте стыкового соединения разнородных стержней (нагружение растягивающей силой), пластин (растяжение и/или изгиб) и труб (внутреннее давление и растяжение) при установившейся ползучести. Напряженное состояние менее прочного металла непосредственно у стыка оказалось сходным по характеру с напряженным состоянием мягких прослоек при ползучести. Сопоставление расчетных эпюр напряжений с расчетно-экспериментальными, полученными методом муара, показало удовлетворительное соответствие касательных напряжений и интенсивности напряжений. Для нормальных напряжений имеет место качественное совпадение.

3. Влияние различия скоростей ползучести сваренных металлов на длительную прочность РСС предложено учитывать с помощью коэффициента концентрации интенсивности напряжений, для определения которого получены простые формулы и графики. Результаты испытаний на длительную прочность РСС сталей 12Х1МФ и 12Х18Н12Т подтвердили обоснованность такого подхода.

4. Для определения ширины обезуглероженной и науглероженной прослоек предложена методика, в которой процессы обезуглероживания одного металла и науглероживания другого считаются взаимосвязанными. Это позволило установить соотношение между размерами обезуглероженной и науглероженной прослоек, отразить взаимовлияние свойств сваренных сталей на скорости роста прослоек.

5. Экспериментально обнаружена связь формы и скорости роста обезуглероженной прослойки с геометрическими особенностями сварного соединения: при наклонном расположении границы сплавления наблюдается разворот фронта обезуглероженного слоя и в конечном итоге он становится перпендикулярным оси соединения; вблизи усиления контактного стыка ширина обезуглероженной прослойки больше, чем в средней части толщины стенки. Для объяснения и описания этой связи

с помощью метода конформных отображений решена двумерная задача диффузии углерода. Полученные расчетные данные хорошо согласуются с экспериментальными. Предложенная методика позволяет исключить влияние геометрического фактора при обработке результатов измерения скорости роста обезуглероженных прослоек.

6. Предложена методика расчетной оценки длительной прочности РСС, учитывающая разупрочнение вследствие обезуглероживания. Ее экспериментальную основу составляют данные по скорости роста обезуглероженных прослоек и результаты относительно кратковременных испытаний на длительную прочность РСС в исходном состоянии после сварки и после предварительного старения. Режимы старения выбираются такими, чтобы ширина обезуглероженной прослойки в состаренных образцах была близка к ожидаемой в сварных соединениях, обработавших расчетный ресурс.

7. С использованием разработанной методики (п. 6) определены допустимые напряжения и коэффициенты прочности стыков труб из сталей 12Х1МФ и 12Х18Н12Т, выполненных контактной и дуговой сваркой. В случае нагружения труб внутренним давлением в диапазоне температур 520–580°C при расчетной долговечности  $10^5$ – $2 \cdot 10^5$  часов коэффициент прочности контактных стыков меняется от 0,75 до 0,3, дуговых соединений – от 0,8 до 0,45.

8. Выполнены расчетные оценки долговечности РСС труб пароперегревателей котлов сверхкритического давления в зависимости от температуры эксплуатации и наличия дополнительных изгибных напряжений. Показано, что действие последних может снижать долговечность более чем в три раза. Полученные результаты использованы при разработке планов ремонта и реконструкции оборудования крупных электростанций.

9. Разработана и опробована в заводских условиях новая технология сварки разностенных труб из разнородных сталей, при которой выравнивание размеров поперечных сечений труб достигается за счет предварительной наплавки слоя металла на трубу с меньшей толщиной стенки. Испытания на длительную прочность показали высокую работоспособность соединений, выполненных по новой технологии.

10. Разработаны мероприятия по уменьшению изгибных напряжений в РСС труб пароперегревателей: предложено устанавливать подвижные стойки крепления пароперегревателей на поперечные ребра, привариваемые к опорным балкам (а.с. № 694732); создана новая конструкция крепления змеевиков пароперегревателей с помощью неподвижных стоек (а.с. № 688767); с целью предотвращения заземлений змеевиков ширн в поясах ранжирующих креплений предложено заземлить последние.

По теме диссертации имеются следующие публикации:

1. Гецфрид Э.И., Корман А.И. О причинах возникновения изгибных напряжений в необогреваемых участках труб конвективных пароперегревателей котлов энергоблоков 300 МВт. - Электрические станции, 1979, № 12, с. 53-54.

2. Гецфрид Э.И., Шрон Р.З. Ползучесть мягкой прокладки при совместном действии растяжения и изгиба. - Проблемы прочности, 1980, № 6, с. 67-70.

3. Гецфрид Э.И., Корман А.И., Шрон Р.З. Оценка долговечности разнородных контактных стыков труб конвективных пароперегревателей. - В кн.: Освоение и исследование головного блока 500 МВт Троицкой ГРЭС на экибастузском угле/Сб. науч. тр. УралВТИ. - Челябинск: Южно-Уральское кн. изд-во, 1980, вып. 24, с. 197-205.

4. Гецфрид Э.И. Напряженное состояние разнородных сварных соединений при осесимметричной и плоской деформации в условиях установившейся ползучести. - В кн.: Вопросы сварочного производства/Сб. науч. тр. Челяб. политех. ин-та. - Челябинск: ЧПИ, 1981, вып. 266, с. 18-24.

5. Гецфрид Э.И., Шрон Р.З. Напряженное состояние разнородных сварных соединений при растяжении в условиях ползучести. - Проблемы прочности, 1982, № 6, с. 36-41.

6. Прогнозирование длительной прочности разнородных сварных соединений/Э.И. Гецфрид, Р.З. Шрон, А.И. Корман, А.А. Малыгина. - Сварочное производство, 1982, № 9, с. 4-6.

7. Методика прогнозирования длительной прочности и дол-

говечности разнородных сварных соединений/Р.З. Шрон, Э.И. Гецфрид, А.И. Корман, А.А. Малыгина. - В кн.: Сварка/Тез. докл. конф. сварщиков Урала, 2-4 марта 1982 г., Курган, 1982, с. 27-29.

8. Гецфрид Э.И., Шрон Р.З. О расчете ширины обезуглероженной и науглероженной прослоек в сварном соединении разнородных сталей. - В кн.: Вопросы сварочного производства/Сб. науч. тр. Челяб. политех. ин-та. - Челябинск: ЧПИ, 1983, с. 104-108.

9. Гецфрид Э.И., Шрон Р.З., Малыгина А.А. Расчетная оценка диффузии углерода в зоне сплавления разнородных сталей. - Автоматическая сварка, 1985, № 2, с. 21-24.

10. А.с. № 694732 (СССР). Устройство для крепления конвективных поверхностей нагрева/Э.И. Гецфрид, В.Н. Кормилицин. - Заявл. 03.05.78, № 2613046/24-06, опубл. в Б.И., 1979, № 40.

11. А.с. № 688767 (СССР). Устройство для крепления конвективных поверхностей нагрева/Э.И. Гецфрид, А.З. Федосов, А.Д. Постников. - Заявл. 23.01.78, № 2573494/24-06, опубл. в Б.И., 1979, № 36.

*Э.И. Гецфрид*